



Bilan d'eau en trois points de la nappe phréatique générale du Tchad Water balance in three points of the water table aquifer of Chad

Jean-Louis Schneider, Dominique Thiéry

► To cite this version:

Jean-Louis Schneider, Dominique Thiéry. Bilan d'eau en trois points de la nappe phréatique générale du Tchad Water balance in three points of the water table aquifer of Chad. Pangea infos, 2002, 37/38, pp.45-52. insu-00948051

HAL Id: insu-00948051

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00948051>

Submitted on 17 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Bilan d'eau en trois points de la nappe phréatique générale du Tchad

Water balance in three points of the water table aquifer of Chad

Jean-Louis SCHNEIDER (1) et Dominique THIÉRY (2)

(1) 13, rue Winston-Churchill, 45100 Orléans, France

(2) BRGM, Service Eau, 3, avenue Claude-Guillemain, 45100 Orléans, France

Résumé

L'augmentation de la demande d'eau des pays sahéliens nécessite une quantification des ressources renouvelables. Des déterminations de bilan d'eau ont été effectuées dans ce but par modèle global en trois points de la nappe phréatique générale du Tchad. Les lames d'eau météorique atteignant annuellement la nappe varient considérablement d'une région à une autre selon leur aridité : de l'ordre de 170 mm en zone tropicale humide contre 68 mm pour la nappe des sables éoliens du Kanem. La recharge peut être encore plus faible ou même nulle dans l'ensemble fluvio-lacustre du Chari Baguirmi où les reprises par exfiltration sont particulièrement importantes.

Mots-clés : aridité ; exfiltration ; modèle global ; Sahel ; Tchad ; zone tropicale humide.

Abstract

The increase of the water demand in the Sahelian countries requires the quantitative knowledge of the renewable resources. Water balance analyses were carried out using a lump model on three observation wells tapping the water table aquifer in Chad. The rainfall reaching the water table is largely variable depending on the climatic areas: around 170mm/yr in humid tropical zone, 68mm/yr in aeolian sands of Sahel. It is only some mm or even nil in the fluvio-lacustrine deposits where the exfiltration losses are important.

Key words: aridity ; exfiltration ; lump model ; Sahel ; Chad ; humid tropical zone.

1. INTRODUCTION

L'hydrogéologie tchadienne est restée pendant plusieurs décennies au stade du qualitatif. L'augmentation de la demande en eau et une meilleure connaissance des alternances climatiques et donc des conditions de recharge des nappes souterraines amènent à rechercher le maximum de données quantitatives sur les phénomènes d'hydraulique souterraine et donc sur les ressources en eau renouvelables. La présente note expose l'interprétation par modèle hydrologique global de mesures piézométriques effectuées dans les années 60 en trois points de la nappe phréatique générale (Schneider, 2001).

2. CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

Le territoire de la République du Tchad qui s'étend sur 1750 km au sud du Tropique du Cancer montre trois grandes zones climatiques :

- une très vaste zone saharienne, septentrionale, couvrant quelque 595 000 km² sur un total de 1 284 000 km²,

1. INTRODUCTION

The Chad hydrogeology never got beyond the qualitative phase for several decades. The increase of the water demand and a better knowledge of the climatic alternations, and therefore of the refill of the groundwater lead to extensive research on the quantitative data of the underground hydraulic phenomenon and, as a consequence, on the renewable water resources. This paper presents the interpretation, using a lump hydrological model, of piezometric data obtained in the 60's at three points of the general water table aquifer (Schneider, 2001).

2. HYDROGEOLOGICAL SETTINGS

The Chad Republic territory extends 1750km, south from the Tropic of Cancer, and has three main climatic zones:

- *A large Northern saharan zone, covering some 595,000 km² of the total 1,284,000 km², that is 46%.*

soit 46 %. L'indice d'aridité (Schneider, 1993) y est supérieur à 4 ; la pluie annuelle est inférieure à 200 mm ; les années sèches ne voient aucune précipitation.

- une zone sahélienne représentant quelque 525 000 km², soit 41 % de la superficie totale du pays. La pluie annuelle se situe entre 850 et 200 mm ; l'indice d'aridité est supérieur à 0,20.

Les eaux souterraines sont soumises à d'importantes reprises par exfiltration. Il en résulte, au niveau de la surface de la nappe générale, des formes déprimées dans les milieux lithologiques faiblement perméables du Chari Baguirmi et probablement du Salamat. Les cours d'eau permanents et certains cours d'eau temporaires assurent l'alimentation de la nappe.

Le piézomètre DJERMAYA, implanté dans les dépôts fluviolacustres du Pléistocène moyen/inférieur du Chari Baguirmi, se situe dans ce schéma hydraulique.

Un autre piézomètre, NGOURI, correspond à la même zone climatique, mais l'aquifère correspond à des sables éoliens affleurants mis en place lors de la phase aride ogolienne (20 000-15 000 B.P). La perméabilité élevée de ces sables constitue un caractère favorable à l'infiltration des eaux météoriques ; il en résulte une recharge privilégiée qui se traduit par l'existence de deux 'dômes' piézométriques dont les cotes dépassent + 280 m au S-E et + 300 m au N-W.

- une zone tropicale humide, partie septentrionale de l'«Afrique humide». La pluie annuelle y dépasse 850 mm ; lors des années les plus sèches, la pluie annuelle est supérieure à 600 mm, i.e. la pluie moyenne à N'Djamena. Cette troisième zone représente quelque 163 000 km², soit seulement 13 % du territoire.

Sa partie occidentale (bassin du Logone) est particulièrement peuplée, avec le tiers de la population du pays ; la densité peut avoisiner 50 hab./km².

La région se caractérise par des ressources renouvelables annuelles importantes.

La nappe générale est drainée par les cours d'eau. Les débits d'étiage correspondent aux écoulements souterrains passant à l'émergence dans le fond des vallées entaillées dans des dépôts fluviolacustres oligocènes (Continental Terminal).

La figure 1 montre les hydro-isohypses + 400 et + 350 m.

Un bilan d'eau a été établi dans cette région, à Bebedjia.

The aridity index (Schneider, 1993) of this area is greater than 4; the annual rainfall is below 200 mm and nil during the dry years.

- *A Sahelian zone representing about 525,000 km², i.e. 41% of the total surface of the country. The annual rainfall varies between 850 and 200 mm; the aridity index is above 0.20.*

The underground waters are subjected to important exfiltration losses. As a result, the local water table is anomalously low in the Chari Baguirmi and probably Salamat regions due to poorly permeable lithological environments. The permanent streams and some temporary ones ensure the supply of groundwater.

The DJERMAYA piezometer, installed in the fluvio-lacustrine deposits of the middle/lower Pleistocene of Chari Baguirmi, is part of this hydraulic diagram.

Another piezometer, NGOURI, corresponds to the same climatic zone, but the aquifer is characteristic of some outcropping aeolian sands formed during the Ogolian dry phase (20,000-15,000 B.P). The high permeability of these sands favours the percolation of meteoric water. A result is the refill that is expressed by the existence of two piezometric 'domes' with spot-heights greater than +280 m to the SE and +300 m to the NW.

- *A humid tropical zone, northern part of the 'humid Africa'. Its annual rainfall is above 850 mm; during the driest years, the annual rainfall is greater than 600 mm, i.e. the average rainfall in N'Djamena. This third zone represents about 163,000 km² which is only 13% of the territory.*

Its western part (the Logone basin) is densely inhabited, with a third of the country's population ; the density can come close to 50 inhab./km².

The region is characterised by important annual renewable resources.

The general groundwater is drained by the streams. The low-water flows correspond to the underground flows passing by the source at the bottom of the valleys that cut into the fluviolacustrine deposits (Continental Terminal).

Figure 1 shows the +400 and +350 m hydro-isohypse.

A water balance was established in this region in Bebedjia.

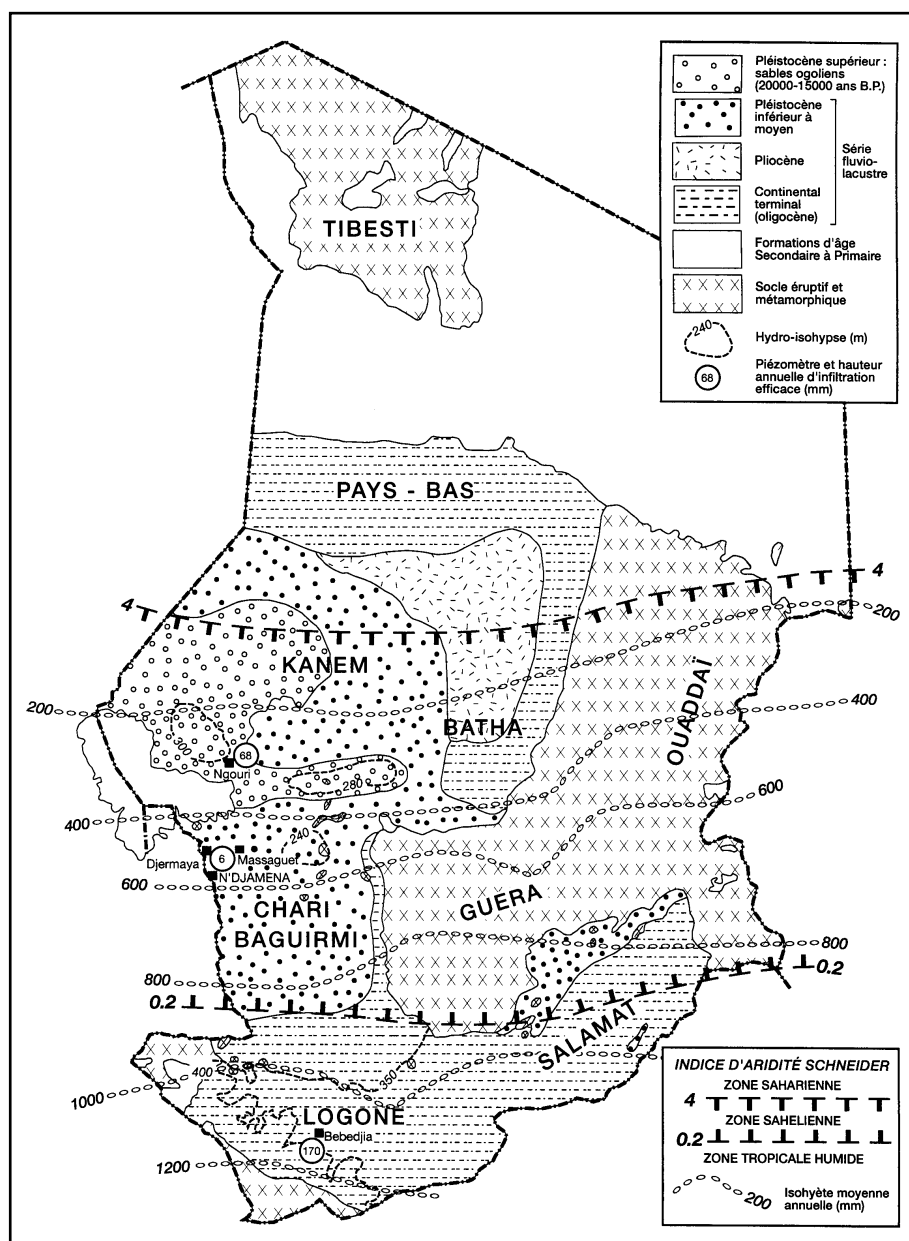


Fig. 1 – Les grands ensembles climatiques et hydrogéologiques du Tchad.
Fig. 1 – The climatic and hydrogeological main regions of Chad.

3. SIMULATION DES RELATIONS PLUIE-NIVEAU

31. Le modèle GARDENIA

L'analyse

L'analyse des variations piézométriques sur les trois sites a été réalisée en mettant en œuvre le modèle hydrologique GARDENIA du BRGM.

Il s'agit d'un modèle global pluie-niveau fonctionnant au pas de temps journalier, décadaire ou mensuel (les modélisations ont été faites ici au pas de temps journalier).

3. SIMULATION OF THE RAINFALL-LEVEL RELATIONSHIPS

31. The GARDENIA model

The analysis

The analysis of the piezometric variations at the three sites has been done implementing the BRGM GARDENIA hydrological model.

This is a rainfall-level global model that works with either a daily, 10-day or monthly timescale (the modelings are made here with a daily timescale).

Il permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant ou à une source ou bien un niveau piézométrique dans une nappe d'eau souterraine (Roche & Thiéry, 1984; Thiéry & Boisson, 1991).

L'allure exponentielle du tarissement du débit ou du niveau des nappes d'eau souterraine rappelant celle de la vidange d'un réservoir, le comportement d'un système aquifère peut être représenté par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres.

Le modèle qui fait intervenir au maximum cinq paramètres globaux, réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évapotranspiration) pour chacun des pas de temps de calcul.

32. Simulation en milieu tropical humide : Bebedjia

Les mesures de plans d'eau ont été faites en 1961 et 1962 sur le puits IRCT.

Les profondeurs du niveau d'eau par rapport au sol ont fluctué entre 10,7 et 14,3 mètres (fig. 2, Torrent, 1965) avec un niveau supérieur courant octobre et un étiage courant juillet.

Le modèle a pris en compte les données météorologiques relevées à Moundou (en 1934-1978), ville située à 50 km à l'W-SW de Bebedjia.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) annuelle est estimée à 1 844 mm contre une pluie moyenne P de 1 179 mm.

Pour un coefficient d'emmagasinement estimé à 1,6 %, la pluie efficace est évaluée à 377 mm, soit 14 % de P. La nappe se remplit et se vide assez rapidement : en 3,8 et 2,7 mois.

La figure 2 montre que le modèle permet de simuler correctement les observations du niveau piézométrique.

Les années particulièrement sèches abaissent le niveau de la nappe en fin d'étiage de moins de 0,5 m par rapport à un étiage moyen.

The model simulates the flow at the outlet of a watershed, at a source or at a piezometric level of a ground water aquifer (Roche & Thiéry, 1984; Thiéry & Boisson, 1991).

The exponential trend of the drying up of the flow or ground water levels is similar to that of the emptying of a reservoir, the behaviour of the aquifer system can therefore be represented as a group of reservoirs emptying themselves in each other.

The model uses a maximum of 5 global parameters to calculate a balance between the inputs (precipitation) and the outputs (discharge or evapotranspiration) for each of the timescales.

32. Simulation in humid tropical zone: Bebedjia

The water table measurements were made in 1961 and 1962 from the IRCT well.

The depths of the water level below the soil surface fluctuated between 10.7 and 14.3 m (fig. 2, Torrent, 1965) with a highest level in October and a low-water state in July.

The model took into account the meteorological measurements in Moundou (from 1934 to 1978), city situated 50 km W-SW of Bebedjia.

The annual potential evapotranspiration (PET) is about 1,844 mm against a mean rainfall P of 1,179 mm.

For a coefficient of storage equals about 1.6%, the effective rainfall is around 377 mm, i.e. 14% of P. The water table aquifer fills and empties itself quickly: in 3.8 and 2.7 months respectively.

Figure 2 shows that the model allows to correctly simulate the piezometric level observations.

The particularly dry years lower the water table level at the end of the low-water period by less than 0.5m compared with the average low-water.

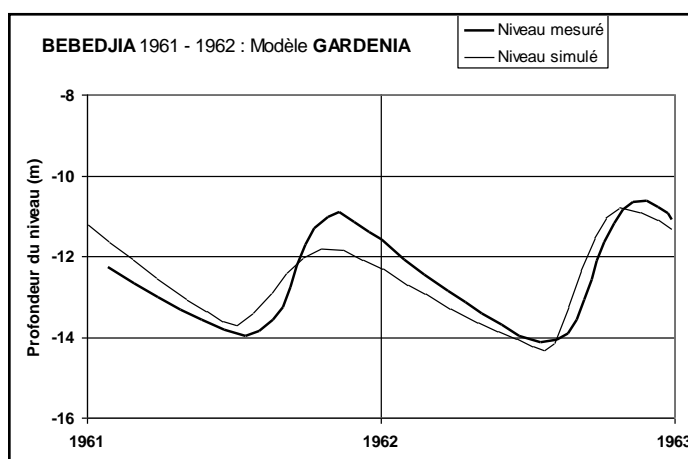


Fig. 2 – Bebedjia. Modélisation des niveaux piézométriques 1961-1962.

Fig. 2 – Bebedjia. Modelling of the piezometric levels 1961-1962.

33. Simulations en zone sahélienne

331. Sables ogoliens du Kanem : NGOURI

Le puits se trouve dans une dépression interdunaire de l'erg ogolien. Il capte des sables éoliens à perméabilité élevée.

Les mesures de plan d'eau utilisées datent des années 1963-65. Les profondeurs du niveau d'eau par rapport au sol ont varié entre 3,7 et 4,0 mètres (Schneider, 2001).

Les données météorologiques proviennent de la station de Bol, en bordure du lac Tchad, à 70 km à l'W-SW de Ngouri.

La pluie médiane (P) est de 309 mm par an.

La pluie efficace annuelle est estimée à 79 mm, soit 25 % de P.

Le modèle indique une infiltration de 68 mm par an, soit 22 % pour un emmagasinement de 24 %.

332. Formations fluviolacustres pléistocènes : DJERMAYA

Un forage a fait l'objet d'une surveillance piézométrique de 1963 à 1968 (Schneider, 2001). Le plan d'eau a varié entre 28,58 et 28,64 m/sol.

Le profil de la nappe montre régionalement un gradient hydraulique de 1.10^{-3} depuis le Chari vers l'hydro-isohypse fermée +240 m du Chari Baguirmi où la dépression piézométrique est liée aux reprises par exfiltration.

L'ETP annuelle est évaluée à 2 075 mm, l'évapotranspiration réelle (ETR) à 378 mm. La pluie annuelle prise en compte est de 487 mm.

Pour un coefficient d'emmagasinement estimé à 4 %, la pluie efficace est estimée à 109 mm (soit 22,4 % de P) et l'infiltration efficace à 5,7 mm (soit 1,1 % de P).

La figure 3 montre que le modèle permet de reproduire les évolutions piézométriques. Il convient cependant de remarquer que les mesures étant peu nombreuses, les résultats obtenus ne sont que des ordres de grandeur.

33. Simulations in sahelian zone

331. Ogolian sands of Kanem: NGOURI

The well is situated in an interdune depression of the Ogolian erg. It receives high permeability aeolian sands.

The water table measurements used are from 1963 to 1965. The water level depths from the soil surface varied between 3.7 and 4.0 meters (Schneider, 2001).

The meteorological data came from the Bol weather station, at the border of lake Chad, 70km W-SW of Ngouri.

The median rainfall (P) is 309mm per year.

The annual effective rainfall is about 79mm, which is 25% of P.

The model indicates percolation rates of 68mm per year, i.e. 22% for a storage of 24%.

332. Fluviolacustrine formations of the Pleistocene: DJERMAYA

A bore hole was monitored for piezometric data from 1963 to 1968 (Schneider, 2001). The water table fluctuated between 28.58 and 28.64m from the soil surface.

A section of the water table shows a regional hydraulic gradient of 1.10^{-3} from the Chari towards the Chari Baguirmi closed +240 m hydro-isohypse where the piezometric depression is linked to the exfiltration losses.

The annual PET is about 2075mm, the real evapotranspiration (RET) is about 378mm. The annual rainfall accounted for corresponds to 487mm.

For a coefficient storage of about 4%, the effective rainfall is 109mm (i.e. 22.4% of P) and the effective percolation is 5.7mm (i.e. 1.1% of P).

Figure 3 shows that the model allows to reproduce the piezometric changes. It is however necessary to note that only few measurements were taken so that the results obtained are only an indication of the orders of magnitude.

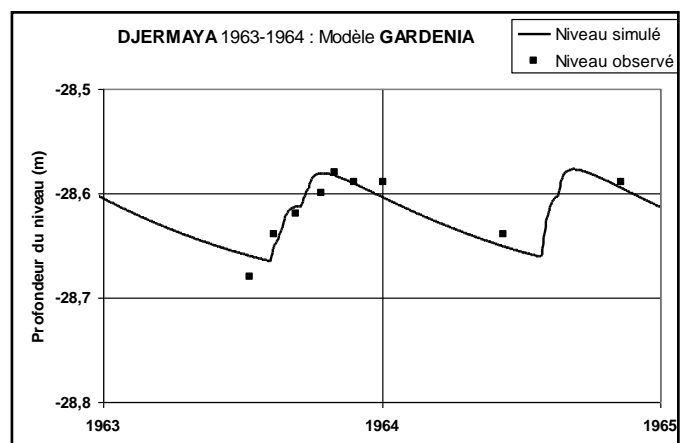


Fig. 3 – Djermaya. Modélisation des niveaux piézométriques 1963-1964.

Fig. 3 – Djermaya. Modelling of the piezometric levels 1963-1964.

Un autre piézomètre, LAMADJI, situé à 15 km au sud de Djer-maya, a également fait l'objet d'une surveillance en 1963-64 et d'une modélisation non représentée ici. Les niveaux d'eau extrêmes ont été de 16,54 et de 16,71 m/sol.

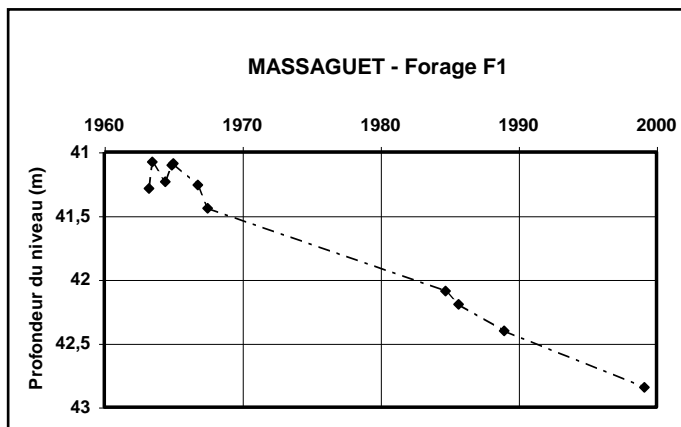
L'ETR a été estimée à 218 mm et l'infiltration efficace à 8,5 mm pour un coefficient d'emménagement de 1,7 %.

4. PERTES PAR EXFILTRATION SUR LE CHARI BAGUIRMI

Vers l'est, le niveau de la nappe s'enfonce sous le sol en direction du "creux" piézométrique où les niveaux les plus profonds avoisinent 60 m.

Les variations saisonnières de niveau dues à l'infiltration des eaux météoriques deviennent imperceptibles au delà de 40 m/sol.

Au contraire les mesures mettent en évidence un mouvement de baisse de niveau continu comme cela a été observé par exemple à Massaguet, à 45 km à l'E-NE de Djer-maya (fig. 4).



Another piezometer, LAMADJI, 15km south of Djer-maya, has already been monitored in 1963-64 and the results have been modelled but this is not presented here. The extreme water levels were 16.54 and 16.71m from the soil surface.

The RET has been estimated at 218mm and the effective percolation at 8.5mm for a coefficient of storage equals 1.7%.

4. EXFILTRATION LOSSES ON THE CHARI BAGUIRMI

To the east, the water table level deepens towards the piezometric 'hole' where the deepest levels are close to 60m.

The seasonal variations of the level caused by percolation of the meteoric waters become unperceivable below 40m depth.

By contrast, the measurements reveal a continuous movement of lowering of the level like that observed for example in Massaguet, 45km E-NE of Djer-maya (fig. 4).

Fig. 4 – Massaguet. Evolution du niveau piézométrique au forage F1 (1963 à 1998).

Fig. 4 – Evolution of the piezometric level at the F1 bore hole in Massaguet 1963-1998.

Le long approfondissement naturel du niveau de la nappe a provoqué l'assèchement de la nappe des sables du Pléistocène inférieur, la nappe se trouvant maintenant uniquement dans les argiles pliocènes au centre de la dépression piézométrique (Biroué *et al.*, 1993). Le même phénomène est observé au Batha, en bordure orientale du bassin : cf. fig. 1. Les plans d'eau se trouvent actuellement à plus de 50 m/sol (Schneider, 1994). Les eaux profondes du Chari Baguirmi et du Batha datent du dernier grand optimum climatique (3500-3200 B.P.). On pense que les eaux qui se sont infiltrées ultérieurement, en particulier lors du Grand Maximum solaire (1100-1250 A.D.) ont été reprises par exfiltration lors du Petit Age Glaciaire (1250-1850 A.D.), pour la majeure partie lors des Minimums solaires Spörer (1400-1600 A.D.) et Maunder (1645-1715 A.D.). Il est

The large natural lowering of the water table caused the drying up of the lower Pleistocene sands aquifer, which can only be found in the Pliocene clays in the centre of the piezometric depression (Biroué *et al.*, 1993). The same phenomenon is observed at Batha, at the western edge of the basin: cf. Fig. 1. At present, the water table levels are in excess of 50 m below the soil surface (Schneider, 1994). The deep waters of Chari Baguirmi and Batha are dated from the last great climatic optimum (3500-3200 B.P.). It is thought that the waters that have percolated since then, particularly during the Great solar Maximum (1100-1250 A.D.), have been lost by exfiltration during the Little Ice Age (1250-1850 A.D.), mainly during the Spörer (1400-1600 A.D.) and Maunder (1645-1715 A.D.) solar Minimums. It is possible that the beginning of the

possible que le début des reprises évapotranspiratoires soit contemporain de l'assèchement total du lac Tchad au début du XV^e siècle A.D. et corresponde donc au Minimum Spörer.

Plusieurs estimations des ressources en eau souterraine du Chari Baguirmi ont été présentées durant les trois dernières décennies.

Dans l'élaboration de la carte de planification des Etats du C.I.E.H., le BRGM (1976) a estimé que la nappe générale de la région recevait une lame d'eau annuelle de l'ordre de 15 mm.

La dernière décennie a vu la réalisation de deux modélisations qui ont confirmé l'état de non-équilibre de la nappe correspondant à la surexploitation naturelle causée par les reprises par exfiltration.

Eberschweiler (1993) estime les pertes pour la période 1990-2020 à une lame d'eau moyenne de 0,2 mm par an. Sa carte du bassin du lac Tchad (1992) donne pour le secteur considéré une lame d'eau évaluée entre 1 et 2 mm.

Bonnet et Meurville (1995) estiment, eux, la perte d'eau à 2-4 mm par an, soit entre 40 et 80 Mm³ pour la région.

5. CONCLUSIONS

Les modélisations pluie-niveau ont permis d'apporter des données quantitatives sur les termes du bilan d'eau :

	P	Pe _{ff}	Pe _{ff} = % de P	l. eff	l. eff. = % de P	Coeff. emm.
NGOURI (sables éoliens)	309 mm	79 mm	25 %	68 mm	22	24 %
DJERMAYA (fl.-lac)	487 mm	109 mm	22 %	6	1,1	4
LAMADJI (fl.-lac)	487 mm	--	--	8,5	1,7	1,7
BEBEDJIA (fl.-lac)	1179 mm	377 mm	32 %	170	14	1,6

Ces valeurs doivent cependant être considérées comme uniquement des ordres de grandeur compte tenu des courtes périodes d'observation disponibles.

On constate que les plus fortes lames d'eau météorique atteignant la nappe sont trouvées logiquement en zone tropicale humide, mais que les pourcentages les plus élevés de ces eaux 'utiles' correspondent à la zone sèche, la forte perméabilité des sables éoliens assurant une infiltration favorable.

On constate également la très faible recharge (6 mm) de la nappe située dans les sédiments peu perméables du Chari Baguirmi.

Ces résultats sont ponctuels et donc difficilement extrapolables pour permettre à ce stade une estimation valable des ressources en eau souterraine renouvelables.

losses by evapotranspiration is contemporary to the complete drying up of the lake Chad at the beginning of the XVth century A.D. and corresponds to the Sporer Minimum.

Several estimations of the Chari Baguirmi ground water resources have been presented during the last three decades.

When designing the planning map of the C.I.E.H. States, the BRGM (1976) estimated that the global water table aquifer of the region received an annual sheet of water of the order of 15mm.

The last decade saw the realisation of two modellings that have confirmed the non-equilibrium status of the water table which corresponds to the natural over-exploitation caused by the exfiltration losses.

Eberschweiler (1993) estimates the losses for the 1990-2020 period to be equivalent to an average sheet of water of 0.2mm per year. His lake Chad basin map (1992) gives a sheet of water between 1 and 2mm for the study area.

Bonnet and Meurville (1995) estimate a 2 to 4mm water loss per year, that is between 40 and 80Mm³ for the region.

5. CONCLUSIONS

The global rainfall-level modellings highlighted new quantitative data about the water balance terms:

These values must nevertheless be considered only as indications of the orders of magnitude because of the short observation periods available.

Note the largest sheets of meteoric water that reached the water table are logically found in the humid tropical zone, but that the highest percentages of these 'useful' waters correspond to the dry zone because the high permeability of the aeolian sands ensures a favourable percolation.

We also note the weak refill (6mm) of the water table situated in the Chari Baguirmi poorly permeable sediments.

These results are point values and can therefore not be extrapolated easily in order to give a valid estimate of the renewable ground water resources.

On doit regretter l'arrêt, en 1968, de la surveillance piézométrique commencée en zone sahélienne en 1963.

Concernant la zone tropicale humide, on a proposé en 1964 – sans succès – d'effectuer une étude globale de bilan sur le bassin de la Tandjilé (6 300 km²) dans les formations C.T. ; le modèle GARDENIA se prêterait remarquablement à la détermination de ce bilan. Pour des sites isolés, on doit disposer d'un historique pluie-niveau d'un minimum de trois ans consécutifs pour obtenir un calage fiable. □

It is regrettable that the piezometric monitoring, started in the sahelian zone in 1963, stopped in 1968.

Concerning the humid tropical zone, it has been suggested – without any success – in 1964 to carry out a global balance study on the Tandjile (6300 km²) in the C.T. formations; the GARDENIA model would be a great tool to determine this balance. For isolated sites, it is necessary to have a rainfall-level historical dataset for a minimum of three consecutive years to obtain a reliable calibration. □

Références bibliographiques

- BIROUE W.K. & SCHNEIDER J.-L. (1993) – Vers l'assèchement de la nappe phréatique au Sahel tchadien ? – C.R. Acad. Sci. Paris, t. 317, série II, p. 89-92.
- BONNET M. & MEURVILLE C. (1995) – Mise en place d'un système de suivi et de gestion de la nappe phréatique du Chari Baguirmi. – Rapport final inéd., 54 p., ann.
- BRGM (1976) – Carte de planification des ressources en eau souterraine des Etats membres du CIEH de l'Afrique soudano-sahélienne. – Notice (118 p.), trois cartes à 1/1 500 000, BRGM, Orléans.
- EBERSCHWEILER C. (1993) – Suivi et gestion des ressources en eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad. Cartographie des aquifères, gestion des ressources en eau. – Rapport final inéd. BRGM, Orléans, n° R 35985.
- ROCHE P.A. & THIERY D. (1984) – Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA. – Rapport BRGM inéd., Orléans, n° 84SGN337EAU.
- SCHNEIDER J.-L. (1993) – Présentation d'un indice d'aridité. Son intérêt hydrogéologique. –C.R. Acad. Sci. Paris, t. 317, Série II, p. 843-846.
- SCHNEIDER J.-L. (1994) – Le Tchad depuis 25 000 ans. Géologie. Archéologie. Hydrogéologie. – Masson, Paris, 134 p., ISBN 2-225-84335-X
- SCHNEIDER J.-L. (2001) – Géologie. Archéologie. Hydrogéologie de la République du Tchad. Mem. 1100 p., 2 vol. Carte de valorisation des eaux souterraines de la République du Tchad, 1/1 500 000, Direction de l'Hydraulique, N'Djamena.
- THIERY D. & BOISSON M. (1991) – Logiciel GARDENIA, modèle global à réservoirs pour la simulation des débits et des niveaux aquifères. – Rapport BRGM, inéd. n° 32209.
- TORRENT H. (1965) – Carte hydrogéologique de la République du Tchad à 1/500 000. Feuille Moundou. – Rapport BRGM inéd., Paris, n° LAM65A10.